



## 基于DEM的黄河流域天文辐射空间分布

作者: 曾燕 邱新法

基于1 km×1 km分辨率的数字高程模型 (DEM) 数据, 利用建立的起伏地形下天文辐射分布式计算模型, 计算了黄河流域1 km×1 km分辨率各月天文辐射的空间分布。结果表明: 局部地形对黄河流域年和四季天文辐射的空间分布影响明显; 在太阳高度角较低的冬季, 地理和地形因子对天文辐射的影响相当强烈, 山区天文辐射的空间差异大, 1月份向阳山坡 (偏南坡) 天文辐射可为背阴山坡 (偏北坡) 的2~3倍, 极端天文辐射的差异可达10倍以上; 而在太阳高度角较高的夏季, 天文辐射空间差异较小, 7月份不同地形极端天文辐射的差异仅在16%左右; 四季中, 地形对天文辐射影响的程度为冬季>秋季>春季>夏季。

基于DEM的黄河流域天文辐射空间分布 曾燕<sup>1</sup>, 邱新法<sup>2</sup>, 刘昌明<sup>1</sup>, 吴险峰<sup>3</sup> (1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 南京气象学院资源环境与城乡规划系, 南京210044; 3. 北京师范大学环境科学研究所, 北京 100875) 1 引言流域分布式水文模型

由于可以清楚地考虑下垫面空间分布不均匀对水文循环的影响, 近年来已成为水文学界的研究热点[1-3]。然而, 分布式水文模型的应用对辐射、降水、气温等地球表面时空多要素数据的要求很高。由于受观测手段、资料获取、研究方法等原因的限制, 目前, 这些数据, 一般都是利用有限点上观测资料经内插或简单经验拟合的方法生成。事实证明: 采用这种方法生成的各要素空间数据, 其精度很难保证, 是影响分布式水文模型模拟精度的重要原因之一[4]。太阳辐射是地球上最基本、最重要的能源 [5]。它在地表上分配的变化, 会根本地改变温度、湿度、降水和大气环流特征, 而且还伴随着热力和动力过程, 与地表水循环密切相关。在不考虑大气影响的情形下, 仅由日地天文关系和地理、地形因素所决定的地表太阳辐射为天文辐射, 它是地表实际入射太阳辐射的基础背景[6], 也是辐射计算、太阳能资源评估及其他相关研究领域重要的起始参量[7, 8]。水平上的天文辐射量由季节、纬度和一天中的具体时间决定。然而, 在实际起伏地形 (以下简称坡面) 情况下, 投射到坡面上的天文辐射除受上述因子影响外, 还受地形因子—坡度、坡向和地形遮蔽的影响。随着太阳在天空中运行轨迹的变化, 地形之间的相互遮蔽影响也在不断的响应变化之中, 这使得起伏地形下天文辐射场的计算变得非常复杂。因此, 在以往的天文辐射计算中, 往往忽略地形因子的影响, 或者仅考虑地形因子中坡度、坡向的影响, 而不考虑地形之间相互遮蔽的影响[9-11]。事实上, 起伏地形中, 周围地形遮蔽作用会强烈影响局地日照时间的分布[12]; 不同坡面上太阳光线入射角的不同, 使其接收的太阳辐射量存在显著差异[13], 从而形成复杂的太阳辐射空间分布。在借鉴以往学者研究工作的基础上[14-17], 本文利用建立的起伏地形下天文辐射分布式计算模型, 在全面考虑地形因子对辐射影响的情况下, 以1 km×1 km分辨率的数字高程模型 (DEM) 数据作为地形的综合反映, 计算黄河流域各月天文辐射的空间分布 (1 km×1 km分辨率), 探讨局部地形对天文辐射空间分布影响的基本规律。

2 研究方法 2.1 坡面天文辐射理论公式在不考虑大气影响的情况下, 坡面接收的天文辐射度

可表示为[5, 8]:  $I_p = I_0(u \sin \theta + v \cos \theta \cos \alpha + w \cos \theta \sin \alpha)$  (1) 式中:  $I_p$  为坡面接收的天文辐射度;  $I_0$  分别为日地距离订正系数和太阳赤纬, 按文献[18]公式计算;  $\theta$  为太阳时角;  $u, v, w$  分别为地理、地形特征因子, 其计算式为:  $u = \sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \alpha$  (2)  $v = \sin \phi \sin \beta \cos \alpha + \cos \phi \cos \beta$  (3)  $w = \sin \phi \sin \beta \sin \alpha$  (4) 式中:  $\phi$  为纬度;  $\beta$  为坡度;  $\alpha$  为坡向。由 (1) 式可知, 坡面天文辐射度由地理、地形特征和天文因子 (太阳赤纬、时角) 决定。对 (1) 进行积分可得坡面在任意日照时段内获得的天文辐射量  $W_s$  为:  $W_s = I_0 \int_{\theta_{sr}}^{\theta_{ss}} (u \sin \theta + v \cos \theta \cos \alpha + w \cos \theta \sin \alpha) d\theta$  (5) 式中:  $\theta_{sr}$  和  $\theta_{ss}$  为坡面日照时段的起始和终止太阳时角;  $T$  为一天的时间 (1 440 min)。

2.2 起伏地形下天文辐射分布式计算模型将坡面天文辐射按一天的日照时间进行积分即可得天文辐射日总量, 但由于地形之间会造成日照的相互遮挡, 而实际地形的起伏又是不规则的, 因此, 实际地形中某一点 (坡面) 在一天的日照时间无法用数学公式表达, 坡面天文辐射日总量只能采用分段积分的方法获得。采用建立的分布式天文辐射计算模型, 模型的基本计算步骤为: 2.2.1 提取地形参数 利用黄河流域1 km×1 km分辨率的DEM数据作为地形的综合反映, 借助地理信息系统ARCGIS 8.1获得每个格网的坡度、坡向、纬度和高程信息。

2.2.2 确定计算点在一天的日照时段数及各日照时段的起始、终止太阳时角 由于起伏地形中日出、日落时角至多与平地相同, 以水平面日出、日落时角作为起伏地形中计算格网点 (计算点) 日照时间的取值域。水平面日出、日落时角计算公式为:  $\theta_0 = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$  (6) 式中:  $\theta_0$  为日出时的太阳时角 (弧度);  $\theta_0$  为日没时的太阳时角;  $\phi$  为格网点纬度;  $\delta$  为太阳赤纬。

给定时间步长, 将水平面上的日出至日没时间  $[-\theta_0, \theta_0]$  划分为  $n$  个时段, 共对应  $n + 1$  个时刻, 即:  $[T_0, T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n]$ , 其中  $T_i$  为第  $i$  时刻对应的太阳时角 (弧度), 并且有  $T_0 = -\theta_0, T_n = \theta_0$ 。根据太阳视轨道方程[8], 确定与各时角对应的

太阳高度角  $[h_0, h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_n]$  和太阳方位角  $[\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n]$ , 与此同时, 借助DEM提供的格网点高程, 计算出时角为 $T_i$ 时, 在方位 $\theta_i$ 上的格网点对计算点造成的地形遮蔽状况函数 $S_i$ , 记 $S_i = 1$ , 表示计算点可照,  $S_i = 0$ , 表示计算点受地形遮蔽不可照[12], 得到遮蔽状况函数数组  $[S_0, S_1, \dots, S_i, \dots, S_n]$ 。依次比较遮蔽状况函数数组 $[S_0, S_1, \dots, S_i, \dots, S_n]$ 中相邻两个数组元素的取值状况, 确定计算点当天的可照时段数 $m$ 及各可照时段的起始和终止太阳时角, 得到可照时段数组  $[\theta_{sr1}, \theta_{ss1}; \theta_{sr2}, \theta_{ss2}; \dots; \theta_{srl}, \theta_{ssl}; \dots; \theta_{srm}, \theta_{ssm}]$ , 其中 $\theta_{srl}$ 、 $\theta_{ssl}$ 为分别为某一可照时段起始和终止太阳时角。

### 2.2.3 计算点日天文辐射量的计算

根据(5)式, 逐时段求算计算点在每个可照时段所获得的天文辐射量, 之后累加得到起伏地形中计算格网点日天文辐射量 $W_0$ 。计算公式为: (7) 对每一格网点计算其日天文辐射量, 之后累加, 获得其逐月和年天文辐射总量, 借助地理信息系统ARCGIS 8.1生成黄河流域1-12月和年天文辐射量空间分布图。

## 3 结果分析

### 3.1 年天文辐射空间分布

根据图1, 统计得黄河流域平均年天文辐射量为 $10\ 798\ \text{MJm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ , 从图中可看出, 年天文辐射有明显的纬向分布特点; 随着纬度的降低, 年天文辐射量由北向南增加; 由于受坡向、坡度和地形遮蔽因子影响, 山区天文辐射表现出明显的非地带性分布特征。

### 3.2 季节天文辐射空间分布

以3-5月代表春季, 6-8月代表夏季, 9-11月代表秋季, 1月、2月和12月代表冬季, 合成黄河流域天文辐射季节分布图, 并对其特征进行统计(表1、图2)。由各季天文辐射空间分布图的色调变化上, 可看出天文辐射有明显的季节变化。就整个流域平均而言, 在4个季节中天文辐射量的大小依次为夏季>春季>秋季>冬季, 从而表现出四季分布的不对称性; 标准差体现了数据间的离散和差异程度, 夏季天文辐射数据的标准差最小, 说明夏季由于太阳高度角较高, 地理因子(纬度)和地形因子(坡度、坡向、地形遮蔽)对天文辐射的影响相对于其他季节要小, 表现出夏季天文辐射的空间差异不大, 整体水平都比较高, 空间分布图色调比较单一。冬季则正好相反, 天文辐射数据的标准差最大, 主要是由于冬季的太阳高度角较低, 地理、地形因子对天文辐射的影响体现得比较明显, 表现出冬季整个流域天文辐射的空间差异很大, 空间分布图色调丰富。另外, 天文辐射的季节空间分布同样体现了山区天文辐射的非地带性分布特征。

### 3.3 月天文辐射特点

黄河流域1-12月天文辐射数据统计特征表明(图3、表2), 就流域平均而言, 在全年中7月份的天文辐射最高, 为 $1\ 264\ \text{MJm}^{-2}\text{month}^{-1}$ ; 12月份最小, 为 $486\ \text{MJm}^{-2}\text{month}^{-1}$ ; 数据标准差正好相反, 7月最小, 12月份最大, 这一点同样体现了地理、地形因子对天文辐射的影响受太阳高度角变化的影响。

### 3.4 山区天文辐射特点

从黄河流域兰州站以上山区1月和7月天文辐射空间分布看(图4), 在太阳高度角比较低的1月份, 山区天文辐射的空间差异非常明显, 向阳山坡(偏南坡)和背阴山坡(偏北坡)的天文辐射差异非常大, 前者以暖色调(红色)为主, 后者以冷色调(蓝色)为主, 前者辐射量一般为后者的2-3倍; 在太阳高度角较高的7月份, 地形对天文辐射依然有一定的影响, 但效果不明显, 整体表现出山区辐射比地势平坦地区略小, 但没有明显的坡向取向。可见, 在冬半年选择适当的坡面地形对太阳能资源的利用极为有利, 而在夏半年地形资源优势并不明显。

### 3.5 起伏地形对天文辐射的影响

为了进一步比较地形对辐射的影响程度, 将应用分布式模型计算的起伏地形下坡面天文辐射(该结果全面考虑了地形因子的影响)与水平面天文辐射(该结果未考虑地形因子的影响)之比(用 $R_b$ 表示)生成空间分布图(图5)。在1月份, 由于太阳高度角较低, 地形对天文辐射的影响非常强烈, 坡面最大天文辐射可为平地的1.762倍, 最小仅为平地的0.153倍, 因此, 不同地形天文辐射的极端差异可在10倍以上。可见, 在冬季, 地形对太阳辐射的影响是不容忽视的, 否则会造成很大的辐射计算误差; 而7月份则不然,  $R_b$ 几乎均小于1, 最大值为1.003, 最小值为0.841, 不同地形极端天文辐射的差异仅为16%左右。可见, 在夏季, 由于太阳高度角较高, 地形对辐射的影响比较小。黄河流域不同月份 $R_b$ 统计特征(表3、图6)进一步说明: 越靠近冬季, 地形对天文辐射的影响越强烈, 不同地形下天文辐射的极端差异也越大, 且秋季(9、10、11月份)影响要比春季(3、4、5月份)略大; 四季中地形对天文辐射影响的程度为冬季>秋季>春季>夏季; 全年中地形影响相对小一些的月份为4至8月。

## 4 结束语

天文辐射量是评估太阳能资源的重要参数, 也是地表实际获得太阳辐射量计算的重要起始数据。本研究主要结论为: (1) 黄河流域年天文辐射量, 由北向南随着纬度的降低呈递增的趋势, 平均年天文辐射量为 $10\ 798\ \text{MJm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ; (2) 就流域平均而言, 在一年四季中, 天文辐射量的大小依次为夏季>春季>秋季>冬季, 表现出四季分布的不对称性; (3) 夏季太阳高度角比较高, 地理、地形因子对天文辐射的影响不明显, 天文辐射的空间差异小。冬季正好相反, 天文辐射的空间差异大; (4) 在1-12月中, 7月份流域平均天文辐射最高, 为 $1\ 264\ \text{MJm}^{-2}\text{month}^{-1}$ , 12月份最小, 为 $486\ \text{MJm}^{-2}\text{month}^{-1}$ ; (5) 在太阳高度角比较低的冬季, 山区天文辐射的空间差异很大, 1月份向阳山坡(偏南坡)天文辐射可为背阴山坡(偏北坡)的2-3倍, 极端天文辐射的差异达10倍以上, 7月份天文辐射空间差异不明显, 极端天文辐射差异仅在16%左右; (6) 四季中地形对天文辐射影响的程度为冬季>秋季>春季>夏季。致谢: 数据计算处理工作在南京气象学院地理空间信息系统实验中心完成, 特表诚挚谢意。

Study on Astronomical Solar Radiation Distribution over the Yellow River Basin Based on DEM Data ZENG Yan<sup>1</sup>, QIU Xinfa<sup>2</sup>, LIU Changming<sup>1</sup>, Wu Xianfeng<sup>3</sup> (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Department of Geography, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044, China; 3. Institute of Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China) Abstract: Based on a distributed model for calculating astronomical solar radiation (ASR), monthly ASR with a resolution of  $1\ \text{km} \times 1\ \text{km}$  for the rugged topography of the Yellow River Basin is calculated, with DEM data as the general characterization of terrain. This model gives an all-sided consideration on factors that influence the ASR. Results suggest that (1) the annual ASR has a progressive decreasing trend from south to north; (2) the order of seasonal ASR is summer>spring>autumn>winter; (3) the geographical and topographical factors have robust effects on the spatial distribution of ASR, particularly in winter where a lower sun elevation angle exists; (4) the ASR magnitude for slopes with a sunny exposure is generally 2 or 3 times that of slopes with a shading exposure in January and the extreme difference of ASR for different terrains is over 10 times; (5) the spatial differences of ASR are relatively small in summer where a higher sun elevation angle exists and the extreme difference of ASR for different terrains is only 16% in July; an

d (6) the sequence of influence strength for topography is winter>autumn>spring>summer. Key words: astronomical solar radiation; rugged terrains; spatial distributions; DEM

**关键词:** 天文辐射; 起伏地形; 空间分布; 数字高程模型(DEM)